



TITLE:

レーザーピンセットを用いた情報
熱機関の実現(非平衡系の物理-非平
衡ゆらぎと集団挙動-,研究会報告)

AUTHOR(S):

秋山, 典之; 鳥谷部, 祥一; 黒田, 真史; 佐野, 雅己

CITATION:

秋山, 典之 ...[et al]. レーザーピンセットを用いた情報熱機関の実現(非
平衡系の物理-非平衡ゆらぎと集団挙動-,研究会報告). 物性研究 2011,
96(1): 165-166

ISSUE DATE:

2011-04-05

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/169480>

RIGHT:

レーザーピンセットを用いた情報熱機関の実現

東京大学 理学系研究科 秋山 典之, 鳥谷部 祥一*, 黒田真史, 佐野雅己
*中央大学理工学部

1 Maxwell's demon と Szilard's engine

マクスウェルのデーモンのように観測と制御を取り入れた系では、温度勾配に逆行した熱流を運ぶ等、一見して自然な方向に反するような変化が可能となる。現在では、デーモンを含めた系の情報論と熱力学の考察から熱力学第二法則とも矛盾しないことが示されている。更に、デーモン的な情報操作を考慮した第二法則の理論的拡張 [1]、及びそれに応える実験 [2] も行われた。総合的にみて、デーモンのパラドックスは解決されたといえる。

しかし、実験的側面から見ると、シラードエンジンの作成やランダウアー原理の検証等、まだやることは残されている。本稿では、レーザーピンセットを用いて作成したシラードエンジンを紹介する。シラードエンジンはマクスウェルデーモンを最も単純化したモデルであり、歴史的には、物理における情報の重要性を示唆して大きな転機を与えたものである。

実験では、レーザーピンセットにより作成した箱型ポテンシャルの壁に対して、コロイド粒子が行う仕事を定量的に評価し、1粒子が準静的に等温膨張する過程をうまく再現することができた。以下がその結果である。

2 実験

以下の図1のような光学系を用いた。水中のコロイド粒子 ($d=0.3\mu\text{m}$, Silica) をYAGレーザー ($\lambda = 1064\text{nm}$) でトラップした状態で、EOD(electro-optic deflector)を用いて高速スキャンする (10kHz)。こうすると、粒子は最早ビームに追随することはできず、スキャンしている範囲の各点でビーム強度に比例したトラップ力を感じるようになる。

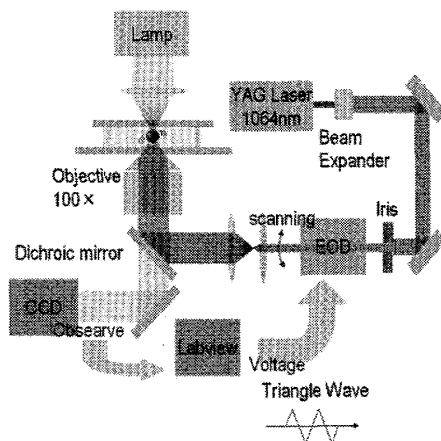


図 1: 光学系

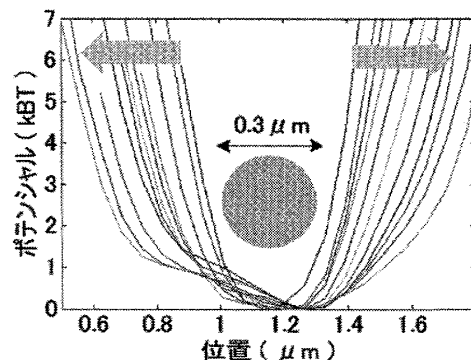
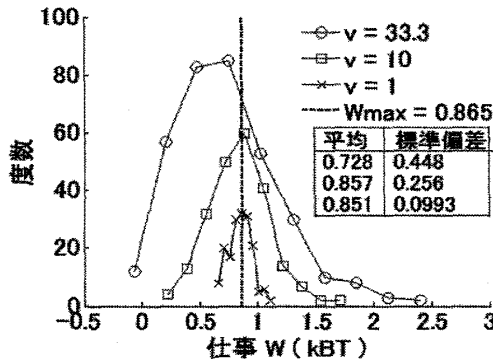
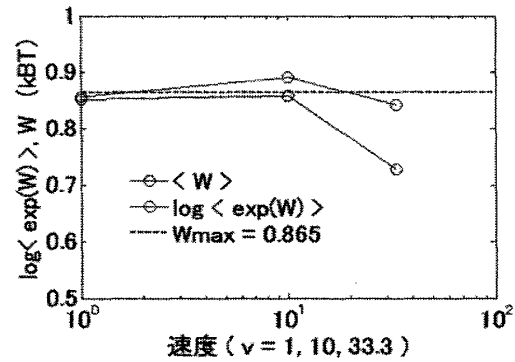


図 2: ポテンシャル U

この方法により、実際にポテンシャルを測定すると、図2のようになり、複数の電圧値 (0.9~1.44Vpp) に対応して、異なる幅のポテンシャルが得られた。

図 3: 膨張速度 v と仕事量 W の関係図 4: $\langle W \rangle$ の減少と Jarzynski 等式の確認

粒子はブラウン運動しているため、矢印の方向にポテンシャル $U(x)$ を滑らかに膨張させていくと、時折、左右の壁に衝突して仕事を行う。その量 W を、

$$W = \sum_{i=0}^{N-1} \Delta W_i = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\partial U(x)}{\partial x} \bigg|_{x_i} dx_i = \sum_{i=0}^{N-1} (\Delta U_{i+1}(x_{i+1}) - \Delta U_i(x_i)) \quad (1)$$

で見積もることができる。その結果を分布として示したのが、図 3 である。まず $v = 1$, $v = 10$ をみると、この場合は、ポテンシャル膨張開始時・終了時の分配関数 Z_0 , Z_1 から計算される最大仕事量 $W_{max} = -\Delta F = k_B T \ln(Z_1/Z_0) = 0.865 k_B T$ とほぼ等しい仕事を得た。このように、シラードエンジンの過程のうち、1 粒子による準静的な膨張を実現することができた（※ $v = 1$ は、ポテンシャル中央から端まで 25 秒かけて膨張する場合に対応）。

また図を見ればわかる通り、両者とも平均値は区別できないが、 $v = 10$ の方が、幅は標準偏差にして 2.6 倍も広がっている。そこで速度をさらに上げ、 $v = 33.3$ として測定したところ分布は広がり、期待されるように、仕事量は減少した。いずれの速度においても Jarzynski 等式は満たされていることも確認した（図 4）。図は三点しかないが、さらなる測定と検証を予定している。

3 課題

本稿では膨張における仕事しか紹介できなかったが、情報量と圧縮する際の仕事まで含めたサイクル全体としての定量的評価をする必要がある。また、高速膨張時の仕事の減少が示唆するように、本実験系を用いれば、有限時間で動く熱機関について実験的にアプローチできる。有限時間の熱機関についてはまだよくわかっていないのが現状なので、良いヒントを提示したいと考えている。

参考文献

- [1] T.Sagawa, M.Ueda, Phys. Rev. Lett. 100, 080403 (2008), T.Sagawa, M.Ueda, Phys. Rev. Lett. 102, 250602 (2009)
- [2] S.Toyabe, T.Sagawa, M.Ueda, E.Muneyuki, and M.Sano, Nature Physics, Vol 6, 988-992 (2010)